

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
POMORSKI ODJEL**

**K O R I C A**

**NIKOLA PAVLIČEVIĆ**

**IZMJENJVAČI TOPLINE U BRODSKIM RASHLADNIM  
SUSTAVIMA**

***ZAVRŠNI RAD***

**DUBROVNIK, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
POMORSKI ODJEL  
BRODOSTROJARSKI STUDIJ**

**IZMJENJVAČI TOPLINE U BRODSKIM RASHLADNIM  
SUSTAVIMA**

***ZAVRŠNI RAD***

*Mentor:*

**doc. dr. sc. MATKO BUPIĆ**

*Pristupnik:*

**NIKOLA PAVLIČEVIĆ**

**DUBROVNIK, 2019.**

Republika Hrvatska  
**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
**POMORSKI ODJEL**  
**Preddiplomski sveučilišni**  
**studij BRODOSTROJARSTVO**

Ur. broj:

Dubrovnik, 15. ožujka 2019.

Kolegij: BRODSKI RASHLADNI UREĐAJI

Mentor: doc. dr. sc. MATKO BUPIĆ, dipl. ing.

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Pristupnik: **NIKOLA PAVLIČEVIĆ**

Zadatak: **IZMJENJIVAČI TOPLINE U BRODSKIM RASHLADNIM SUSTAVIMA**  
***HEAT EXCHANGERS IN SHIP COOLING SYSTEMS***

Zadatak treba sadržavati:

1. Metoda proračuna izmjenjivača topline.
2. Opis proračuna izmjenjivača topline.
3. Zahtjevi klasifikacijskog zavoda za izmjenjivače topline.

Osnovna literatura:

1. Orest Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet u Dubrovniku, Dubrovnik, 1994.
2. Antun Galović, Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.

Zadatak uručen pristupniku: 15. rujna 2018.

Rok za predaju završnog rada: 30. travnja 2019.

*Mentor:*

*Pročelnik odjela:*

**doc. dr. sc. MATKO BUPIĆ**

**doc. dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ**

# IZMJENJIVAČI TOPLINE U BRODSKIM RASHLADNIM SUSTAVIMA

## *HEAT EXCHANGERS IN SHIP COOLING SYSTEMS*

### **SAŽETAK**

U ovom završnom radu opisani su izmjenjivači topline u brodskim rashladnim sustavima, s naglaskom na opis i podjelu kondezatora i isparivača jer danas su to dva najčešća tipa izmjenjivača na brodu. Opisana je načelna podjela, kao i klasifikacija izmjenjivača topline. Rad sadrži postupak proračuna izmjenjivača topline. Zahtjevi klasifikacijskog zavoda za izmjenjivače topline također su objašnjeni u radu.

### **ABSTRACT**

*This paper describes the heat exchangers in the ship cooling systems, with the accent on description and classification of condensers and evaporators because these two are the most common types of the heat exchangers on the ship today. Principle division and the classification are also described. The paper consists of the procedure of calculation of the heat exchanger. Classification society requirements for the heat exchangers are explained, too.*

### **Ključne riječi:**

Izmjenjivači topline, kondezator, isparivač, proračun izmjenjivača topline, zahtjevi klasifikacijskog društva

### **Keywords:**

*Heat exchangers, condenser, evaporator, calculation of heat exchanger, classification society requirements*

Izjavljujem da sam ovaj izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se obitelji na bezuvjetnoj potpori tokom studiranja te mentoru dr. sc. Matku Bupiću na pruženoj pomoći i savjetima tokom pisanja završnog rada.

Nikola Pavličević

# SADRŽAJ

1.	Uvod.....	1
2.	Općenito o izmjenjivačima topline .....	4
2.1.	Načelna podjela izmjenjivača topline .....	4
2.1.1.	Rekuperativni izmjenjivači topline.....	5
2.1.2.	Regenerativni izmjenjivači topline .....	6
2.1.3.	Direktni (izravni) izmjenjivači topline .....	7
2.2.	Klasifikacija izmjenjivača topline .....	8
3.	Proračun izmjenjivača topline .....	14
3.1.	Toplinski tok u izmjenjivaču topline .....	14
3.2.	Koeficijent prolaza topline.....	20
4.	Kondezatori.....	22
4.1.	Kondezatori s cijevnom zavojnicom u bubnju.....	22
4.2.	Protustrujni kondezatori .....	22
4.3.	Shell and Tube kondezator (Kondezator sa snopom cijevi u plaštu).....	24
4.4.	Kondezatori hlađeni zrakom ili vodom koja ishlapljuje.....	25
4.4.1.	Prirodni kondezator (atmosferski kondezator) .....	25
4.4.2.	Evaporativni kondezator .....	26
4.5.	Čišćenje kondezatora .....	27
5.	Isparivači.....	29
5.1.	Suhi isparivači.....	29
5.2.	Potopljeni isparivač .....	30
5.3.	Suhi isparivač s cijevima u plaštu .....	31
5.4.	Pločasti isparivači za hlađenje kapljevina.....	32
5.5.	Pločasti isparivač za tekućine .....	32
5.6.	Problemi kod pločastog izmjenjivača .....	33
6.	Zahtjevi klasifikacijskog zavoda za izmjenjivače topline.....	34
6.1.	Konstrucijski zahtjevi .....	34
6.2.	Armatura .....	34
6.3.	Mjerni instrumenti .....	35

<b>6.4. Kondenzatori .....</b>	<b>35</b>
<b>7. Zaključak .....</b>	<b>37</b>
<b>Popis slika.....</b>	<b>38</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>39</b>

# 1. UVOD

Izmjena topline povezana je s gibanjem čestica. Viša temperatura uzrokuje brže, a niža temperatura sporije gibanje čestica. Poznata je činjenica da topline uvijek prelazi s tijela više na tijelo niže temperature. Tijela ili dijelovi tijela različitih temperatura koja su u međusobnom dodiru nastoje postići temperaturnu ravnotežu izjednačavanjem svojih temperatura. Kao što je poznato, topline prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature. Rad svakog izmjenjivača topline temelji se upravo na ovim, već poznatim, zakonitostima. Izmjenjivači topline nalaze vrlo široku primjenu u tehnici grijanja, hlađenja i klimatizacije, energetske, prehrambene, prerađivačke, autoindustrije, elektronici, svemirskoj tehnici itd. Razlikujemo tri vrste izmjene topline: kondukcija ili provođenje, konvekcija ili strujanje i zračenje. U procesima se može odvijati jedna od navedenih vrsta izmjene topline ili međusobna kombinacija. Ako postoji kombinacija načina i vrsta izmjene topline, za proračun se uzima ona koja je najzastupljenija.

Izmjena topline putem kondukcije se odvija na molekularnoj razini i do nje dolazi pri izravnom kontaktu dviju materija različitih temperatura, gdje energija prelazi s materije više temperature na materiju niže temperature. Srednja brzina gibanja molekula nekog tijela ovisi o temperaturi tijela, tj. ona raste povećanjem temperature odnosno pada smanjenjem temperature. Prilikom sudara molekula toplijeg tijela s molekulama hladnijeg, dolazi do predaje energije pri čemu se brže molekule usporavaju, a spore ubrzavaju, što dovodi do izjednačavanja temperature. Izmjena energije kod plinova se vrši difuzijom molekula, kod kapljevine i krutina elastičnim titražima, a kod metala difuzijom slobodnih elektrona, te je stoga izmjena topline provođenjem ovisna o fizikalnim svojstvima tijela.

Konvekcija je način izmjene topline između fluida i krutog tijela koji se nalaze u direktnom kontaktu. Prilikom strujanja fluida dolazi do komešanja čestica (nesređenog gibanja) gdje čestice iz toplijih područja dospijevaju u hladna područja i obratno, te tako pridonose izmjeni topline. Povećanjem brzine gibanja povećava se i izmjena topline. Postoje dvije vrste konvekcije – slobodna (prirodna) i prisilna konvekcija. Kod slobodne konvekcije gibanje čestica je uzrokovano razlikama gustoća u različitim slojevima fluida. Čestice koje se nalaze uz toplu stijenku se zagrijevaju postaju lakše i izazivaju slobodno strujanje. Do gibanja čestica može doći zbog razlike tlakova koja je nametnuta nekim vanjskim uvjetima (npr.



pumpama i ventilatorima) i u tom slučaju riječ je o prisilnom strujanju odnosno prisilnoj konvekciji. Postoje slučajevi u kojima se istovremeno javlja i slobodna i prisilna konvekcija, a koja od njih će biti utjecajnije na izmjenu topline ovisi o uvjetima u kojima se fluid nalazi. U slučaju da je temperaturna razlika između stijenke i fluida velika, utjecaj slobodne konvekcije će biti veći, dok će pri velikim brzinama strujanja utjecaj slobodne konvekcije biti zanemariv. Prilikom strujanja fluida, uz stijenku se stvara granični sloj čija debljina ovisi uglavnom o žilavosti i brzini strujanja fluida, te o formi stijenke. S obzirom na način strujanja fluida, razlikujemo laminarno i turbulentno strujanje. Kod laminarnog strujanja čestice se gibaju u slojevima koji su paralelni sa stijenkom. Slojevi se međusobno ne miješaju tj. ne dolazi do međusobnog miješanja čestica iz različitih slojeva, te se izmjena topline pri laminarnom strujanju vrši provođenjem topline. Stoga izmjena topline kod laminarnog strujanja ovisi uglavnom o toplinskoj vodljivosti fluida. Povećanjem brzine strujanja dostiže se brzina, koja se naziva kritičnom brzinom strujanja, pri kojoj dolazi do naglog prijelaza iz laminarnog u turbulentno strujanje. Kritična brzina strujanja nije ista za sve fluide, ali osim vrste fluida na kritičnu brzinu utječe dimenzija kanala odnosno cijevi u kojoj fluid struji. Kod turbulentnog strujanja izmjena topline konvekcijom se odvija u laminarnom graničnom sloju, dok se u turbulentnom dijelu izmjena topline odvija putem intenzivnog miješanja uskomešanih čestica fluida. Kod svih do sada spomenutih vrsta izmjene topline pretpostavljeno je da ne dolazi do promjene agregatnog stanja fluida, međutim u industrijskim i termoenergetskim postrojenjima česta je pojava promjene agregatnog stanja fluida (isparavanje, kondenzacija, smrzavanje, taljenje, sublimacija). Kod procesa isparavanja i kondenzacije dolazi do direktnog prijelaza iz kapljevite u parnu fazu i obratno. Smrzavanje i taljenje vezano je uz prijelaz iz kapljevite u kruto stanje i obratno, dok je sublimacija prijelaz iz krutog u plinovito stanje. Odvođenjem topline pri konstantnom tlaku nekoj parnoj fazi, dolazi do smanjenja temperature pare sve do temperature zasićenja za taj tlak. Daljnjim odvođenjem topline počinju se pojavljivati prve kapljice odnosno započinje kondenzacija. U slučaju da stvoreni kondenzat u potpunosti oplahuje površinu stijenke u obliku neprekidnog sloja (filma), onda govorimo o filmskoj kondenzaciji. Ako se površina teško oplahuje i na njoj se stvaraju kapljice kondenzata koje brzo rastu i slijevaju se niz stijenku, tada govorimo o kapljičastoj kondenzaciji.

Prijenos topline pomoću elektromagnetskih zraka naziva se zračenje. Toplinsko zračenje se rasprostranjuje pravolinijski elektromagnetnim valovima različitih valnih duljina. Toplije tijelo zrači energiju, a dio te energije hladnije tijelo apsorbira i tako poveća svoju temperaturu. Ostatak dozračene energije hladnije tijelo ili propusti ili reflektira. Količina

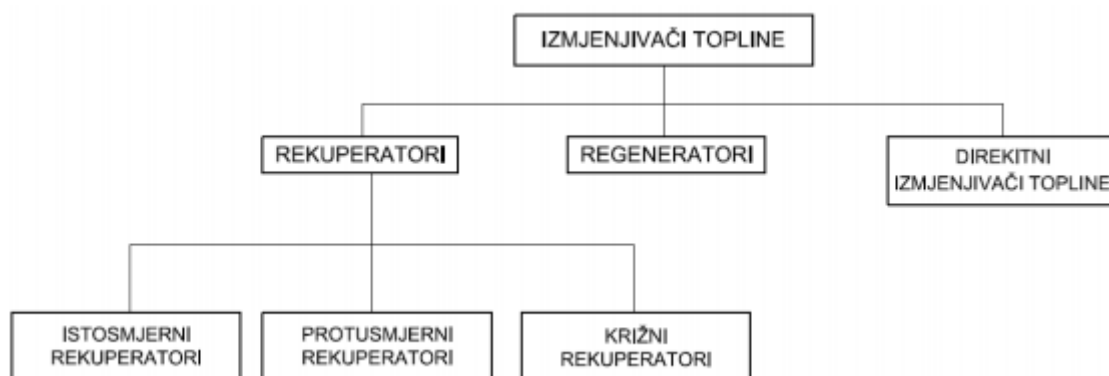
emitirane energije određene valne duljine ovisi o materijalu tijela, stanju površine i temperaturi. Kada tijelo upije cjelokupno zračenje koje padne na njega onda se ono naziva crnim tijelom. Za razliku od provođenja i konvekcije, izmjena topline zračenjem ne zahtijeva postojanje materije za prijenos topline, već se ono može izvoditi i u vakumu.

## 2. OPĆENITO O IZMJENJIVAČIMA TOPLINE

Izmjenjivači topline su uređaji koji se koriste za prijenos topline između dva ili više fluida. Pri tome jedan fluid se hladi, a drugi zagrijava. Fluidi u izmjenjivaču mogu biti odvojeni stijenkom ili zidom, koji sprječavaju njihov izravan dodir, ili mogu biti u direktnom kontaktu, npr. miješalište. Imaju vrlo široku primjenu i to u: postrojenjima centralnog grijanja (bojleri, radijatori), postrojenjima za pripremu potrošne tople vode, rashladnim sustavima (isparivači, kondenzatori), kemijskoj i prehrambenoj industriji kao zagrijači, kondenzatori, kristalizatori, sušionice itd. Također veliku primjenu imaju u termoenergetskim postrojenjima kao parnikotlovi, pregrijači pare, zagrijači zraka, ekonomajzeri itd.

### 2.1. Načelna podjela izmjenjivača topline

Načelno se izmjenjivači topline mogu podijeliti na: rekuperatore, regeneratore i direktne izmjenjivače topline, od kojih su rekuperatori najzastupljeniji u primjeni.



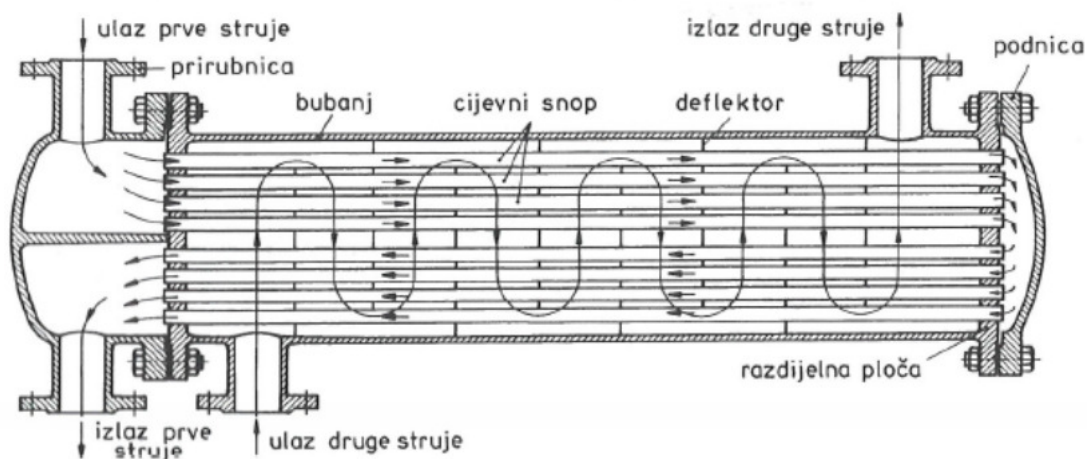
Slika 1. Načelna podjela izmjenjivača topline

### 2.1.1. Rekuperativni izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline kod kojih su struje (tekućine, fluidi) međusobno razdvojeni čvrstom stijenkom nazivaju se rekuperativnim toplinskim aparatima ili, kraće, rekuperatorima. Kod takvih je aparata razdjelna stijenka rashladna odnosno ogrijevna površina, koja ne propušta međusobni izravni dodir struja. Razdjelna stijenka može biti cijevnog ili pločastog oblika, a s obzirom na konstruktivnu izvedbu rekuperatori mogu biti različito izvedeni. Jednu od izvedbi prikazuje Slika 2. Prikazani aparat se sastoji iz snopa cijevi koji je umetnut u bubanj (plašt). Kroz cijevi struji jedna struja, recimo hladnija, koja se prolaskom kroz aparat zagrijava, a u prostoru oko cijevi struji toplija struja koja se hladi prolaskom kroz rekuperator. Osnovna podjela rekuperatora prema međusobnom strujanju fluida kroz rekuperator:

- a) Istosmjerni rekuperatori su izmjenjivači topline kod kojih su struje međusobno paralelne i teku u istom smjeru.
- b) Protusmjerni rekuperatori su izmjenjivači topline kod kojih struje teku paralelno, ali u suprotnom smjeru. Ova konfiguracija toka radnih fluida omogućuje najveću temperaturnu promjenu oba fluida te je stoga i najučinkovitija.
- c) Križni (unakrsni) rekuperatori su izmjenjivači topline kod kojih se struje fluida međusobno križaju. Ovakva konfiguracija toka radnih fluida učinkovitija je od izmjenjivača s istosmjernim tokom, ali nije bolja od izmjenjivača s protusmjernim tokom.

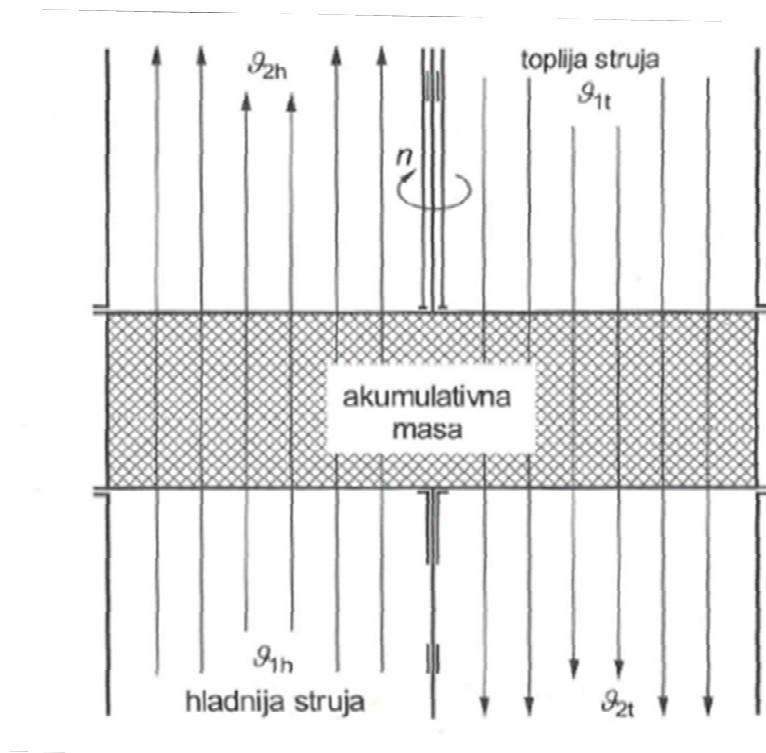
Jedan od najčešćih viđenih rekuperatora je Shell and Tube izmjenjivač topline različitih izvedbi. Osim osnovnih tipova u praksi se nalaze i kombinirani rekuperatori s kombinacijom gore navedenih tokova.



Slika 2. Kombinirani rekuperativni toplinski aparat

### 2.1.2. Regenerativni izmjenjivači topline

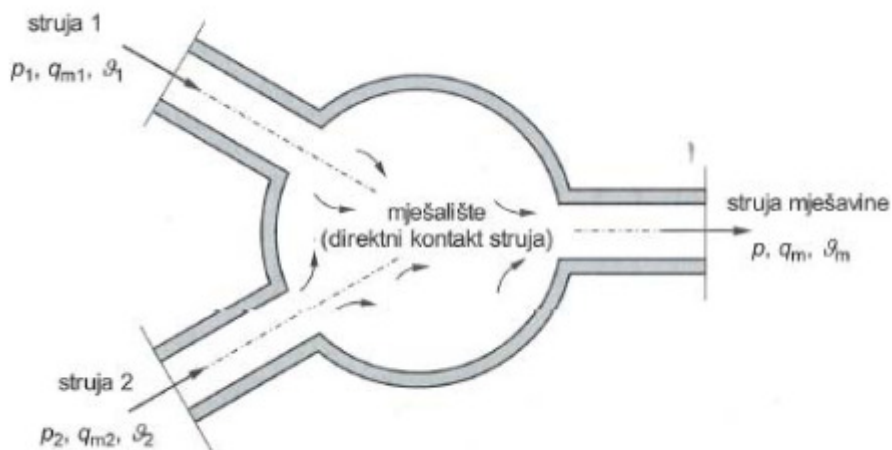
Izmjena topline između dva plina vrši se posredstvom akumulacijske (krute) mase. Shematski prikaz jedne od mogućih izvedbi regenerativnog toplinskog aparata (regeneratora), prikazuje Slika 3. Preko akumulacijske mase izrađene od žice u obliku saća, koja se polagano rotira na vertikalnoj osovini, s jedne strane struji topliji fluid i predaje toplinu rotirajućoj masi koja ju akulira, pri čemu se topliji fluid hladi. S druge strane preko tako zagrijane mase struji hladniji fluid koji preuzima na sebe ovu akumuliranu toplinu u pri tome se zagrijava. Osim izvedbe s rotirajućom masom, regeneratori mogu biti izvedeni s mirujućom akumulacijskom masom s naizmjeničnim prolazom struja. Ovi se aparati koriste uglavnom za struje plin – plin.



Slika 3. Shematski prikaz regenerativnog toplinskog aparata

### 2.1.3. Direktni (izravni) izmjenjivači topline

Izmjena temperature između dva fluida vrši se direktnim dodirom struja u prostoru mješališta. Npr. izravnim mješanjem vode i vodene pare može se sniziti pregrijanje ili postići kondenzacija pare (Slika ). Sabirnici kondenzata nekog termoenergetskog postrojenja primjeri su direktnih izmjenjivača.



Slika 4. Direktni izmjenjivač topline

## 2.2. Klasifikacija izmjenjivača topline

Klasifikacija izmjenjivača topline s obzirom na:

- ostvarivanje kontakta fluida
- konstrukcijske karakteristike
- konfiguracija tokova fluida
- broj prolaza fluida
- stupanj kompaktnosti

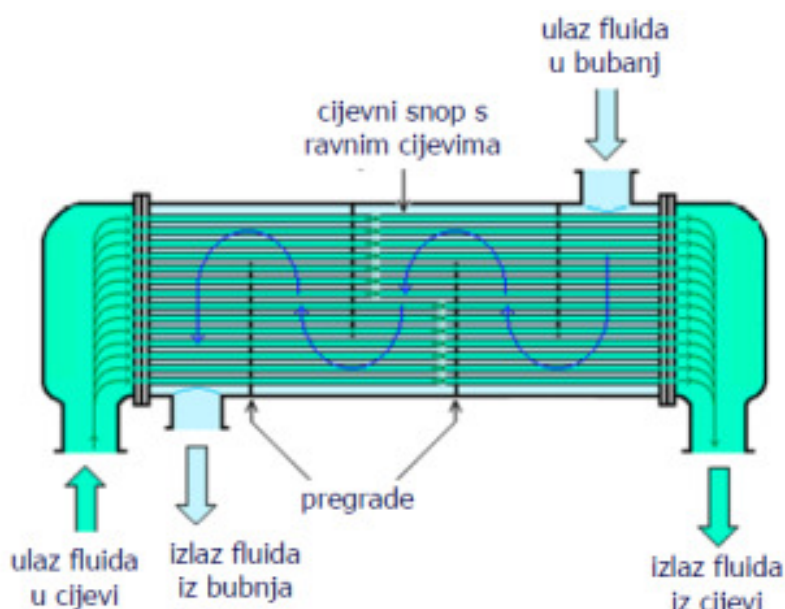
1. Način ostvarivanja kontakta fluida, odnosno postojanje ili ne postojanje razdjelne stijenke između toplije i hladnije struje:

- izmjenjivači topline s izravnim kontaktom fluida
- izmjenjivači topline s neizravnim kontaktom fluida

2. Konstrukcijske karakteristike: proučavajući geometriju konstrukcije, postoji gruba podjela izmjenjivača topline u dvije grupe koje se mogu dalje dijeliti.

Cijevni izmjenjivači topline izrađeni su od cijevi pri čemu jedan fluid struji unutar, a drugi izvan cijevi. Promjer, duljina, raspodjela, debljina stijenke i broj cijevi mogu se mijenjati čime se postižu različita svojstva izmjenjivača topline. Daljnja podjela cijevnih izmjenjivača topline slijedi:

- Koaksijalni izmjenjivači topline – jedna ili više cijevi smještene su koncentrično unutar druge cijevi, većeg promjera. Koriste se kod osjetljivog grijanja i hlađenja procesnih fluida gdje se zahtjeva mala površina izmjene topline
- "Shell and tube" izmjenjivači topline – sastoje se od snopova cijevi smještenih unutar bubnja. Mogu biti horizontalne ili vertikalne izvedbe, s pregradama ili bez, s jednim ili više prolaza fluida. Koriste se za hlađenje ulja, kao generatori pare u nuklearnim elektranama, u kemijskoj industriji itd.



Slika 5. Cijevni izmjenjivač topline Shell and Tube

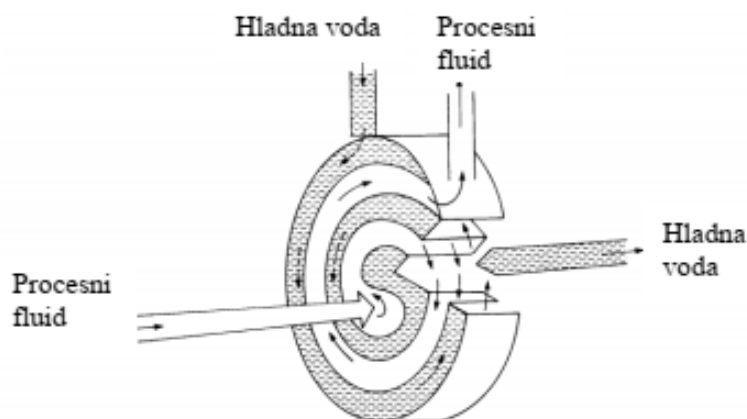


- Spiralni izmjenjivači topline – sadrže spiralne cijevi smještene unutar bubnja čime se postiže veći koeficijent prijelaza topline nego u ravnim cijevima. Upotrebljavaju se za čiste fluide te kao koaksijalni kondenzatori i isparivači.

Pločasti izmjenjivači izrađeni se od tankih ploča koje formiraju strujne kanale. Struje fluida odvojene su ravnim pločama koje su glatke ili valovite. Primjenjuju se za izmjenu topline između raznih kombinacija plinova, tekućina i dvofaznih struja.

- Orebreni pločasti izmjenjivači topline – sadrže paket tankih valovitih ili orebrenih ploča koje odvajaju fluide. Strujanje može biti istosmjerno ili protusmjerno. Upotrebljavaju se za izmjenu topline između dva tekuća fluida, ali su zbog konstrukcije ograničeni visinom tlaka i temperature.

- Spiralni pločasti izmjenjivači topline – dvije paralelne ploče formirane su u spiralu tvoreći dva kanala koji najčešće rade na protusmjernom načelu. Svaki od kanala ima jedan dugi zakrivljeni prolaz. Kompaktni su i skupi.

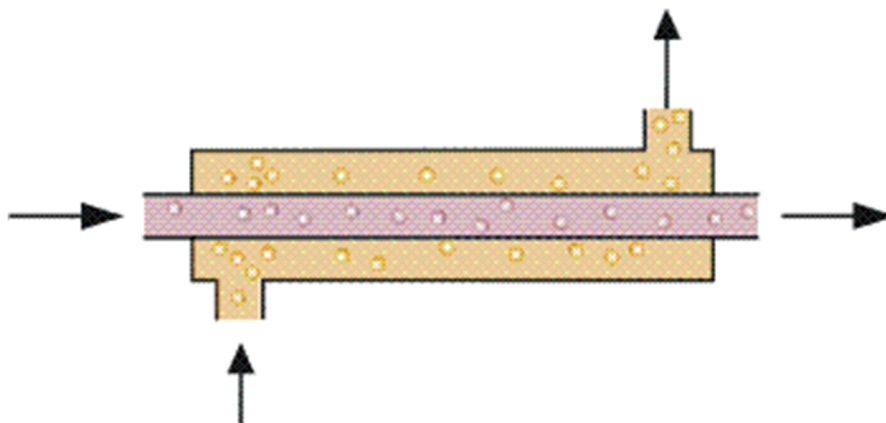


Slika 6. Spiralni pločasti izmjenjivač topline

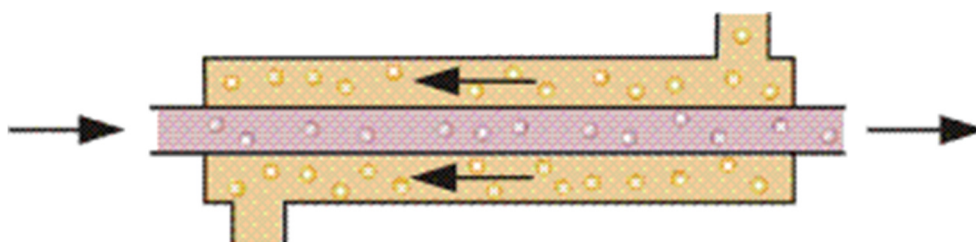
- Lamelni izmjenjivači topline – sadrže set paralelnih i tankih lamela koje se profilirane i zavarene zajedno. Postiže se veća efektivnost i manja masa te veća površina prijelaza topline.

### 3. Konfiguraciju tokova radnih fluida:

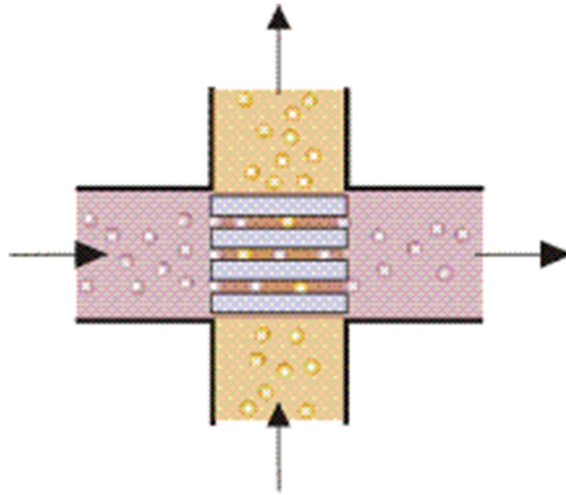
- istosmjerni
- protusmjerni
- križni (unakrsni)



Slika 7. Istosmjerni izmjenjivač topline



Slika 8. Protusmjerni izmjenjivač topline



Slika 9. Križni (unakrsni) izmjenjivač topline

4. Broj prolaza fluida:

- s jednim prolazom fluida
- s više prolaza fluida

5. S obzirom na stupanj kompaktnosti izmjenjivači topline se dijele na:

- kompaktne
- nekompaktne

Navedena podjela, odnosno klasifikacija izmjenjivača topline temelji se na njihovoj svrsi u brodskim sustavima, a to su:

1. Kondenzatori – u sustavima imaju ulogu da se rashladni medij u njima kondenzira. Kondenzacija se vrši na način da se sekundarnim medijem iz okoline (morska voda, slatka voda, zrak) toplina radnoj tvari odvodi te se dovodi iz plinovitog stanja u tekuće stanje.
2. Isparivači – imaju ulogu da se primarna tvar u sustavu ispari. Ovisno o konstrukciji isparivača, isparivanje se može odvijati u cijevima ili na ogrjevnoj površini (pločasti

isparivači). U oba slučaja isparivanje se može vršiti prirodnim ili prisilnim kretanjem radne tvari.

3. Zagrijači – uloga zagrijača je da se primarnoj tvari poveća temperatura, i to maksimalno do temperature isparivanja.
4. Hladnjaci – imaju ulogu da se temperatura primarnoj tvari snizi najmanje do temperature sekundarne tvari, ali da temperatura bude viša od okolne temperature.
5. Rashladnici – koriste se za snižavanje temperature primarnoj tvari do temperature niže od temperature okoline.

### 3. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE

#### 3.1. Toplinski tok u izmjenjivaču topline

Izmjenjeni toplinski tok u izmjenjivaču ovisi o sljedećim varijablama:

$$\Phi = f(k, A_0, t_1', t_1'', t_2', t_2'', C_1, C_2)$$

gdje je:

$\Phi$  – toplinski tok (toplina prenesena u izmjenjivaču topline), W

$k$  – koeficijent prolaza topline, W/(m<sup>2</sup> K)

$A_0$  – ukupna površina prijenosa topline, m<sup>2</sup>

$t_1'$  – ulazna temperatura slabije struje

$t_1''$  – izlazna temperatura slabije struje

$t_2'$  – ulazna temperatura jače struje

$t_2''$  – izlazna temperatura jače struje

$C_1$  – toplinski kapacitet slabije struje, W/K

$C_2$  – toplinski kapacitet jače struje, W/K

Prema dogovoru slabija struja fluida je ona koja ima manju vrijednost toplinskog kapaciteta  $C$  i njoj se pridružuje indeks 1, tj.

$$C_1 = Q_{m, 1} \cdot c_{p, 1}$$

Jača struja, kojoj se pridružuje indeks 2, je ona koja ima veću vrijednost toplinskog kapaciteta, tj.

$$C_2 = Q_{m, 2} \cdot c_{p, 2}$$

gdje je:

$C$  – toplinski kapacitet struje fluida, W/K

$Q_m$  – maseni protok pojedine struje fluida, kg/s

$c_p$  – specifični toplinski kapacitet pojedine struje fluida pri konstantnom tlaku, J/(kgK),

Prema tome vrijedi omjer:

$$0 \leq \frac{c_1}{c_2} = \frac{Q_{m,1} \cdot c_{p,1}}{Q_{m,2} \cdot c_{p,2}} \leq 1$$

Također, za oznake ulazne temperature upotrebljava se apostrof ', dok se za oznaku izlazne temperature upotrebljava apostrof ''.

Toplinski tok za svaki fluid može se izraziti toplinsko-bilansnom jednačbom, tj.

- za topli fluid

$$\Phi_T = Q_T = Q_{m,T} \cdot c_{p,T} \cdot (T_{T1} - T_{T2}) = Q_{v,T} \cdot \rho_T \cdot c_{p,T} \cdot \Delta T_T = C_T \cdot \Delta T_T$$

- za hladni fluid

$$\Phi_H = Q_H = Q_{m,H} \cdot c_{p,H} \cdot (T_{H2} - T_{H1}) = Q_{v,H} \cdot \rho_H \cdot c_{p,H} \cdot \Delta T_H = C_H \cdot \Delta T_H$$

$$C = Q_v \cdot \rho \cdot c_p = q_m \cdot c_p$$

gdje je:

$Q_v$  – volumni protok fluida, m<sup>3</sup>/h

$\rho_m$  – masena brzina fluida, kg/(s m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  - razlika temperature koju doživi pojedini fluid, K

Uz pretpostavku da nema toplinskih gubitaka slijedi da je:

$$\Phi = Q = C_T \cdot (T_{T1} - T_{T2}) = C_H \cdot (T_{H2} - T_{H1})$$

Iz jednačbe dalje proizlazi, da će fluid s manjom kapacitivnom brzinom doživjeti veću temperaturnu promjenu u izmjenjivaču.

Toplinski tok koji se izmjenjuje između toplog i hladnog fluida može se izraziti toplinsko-kinetičkom energijom

$$\delta\phi = \delta Q = k \cdot (T_T - T_H) \cdot dA$$

gdje je:

$k$  – koeficijent prolaza topline kroz diferencijalnu površinu  $dA$  izmjenjivača topline,  $W/(m^2 \cdot K)$

$T_T, T_H$  – temperature toplijeg i hladnijeg fluida na elementarnoj dužini uređaja,  $K$

S druge strane, iz toplinsko-bilansnih jednadžbi vrijedi da je:

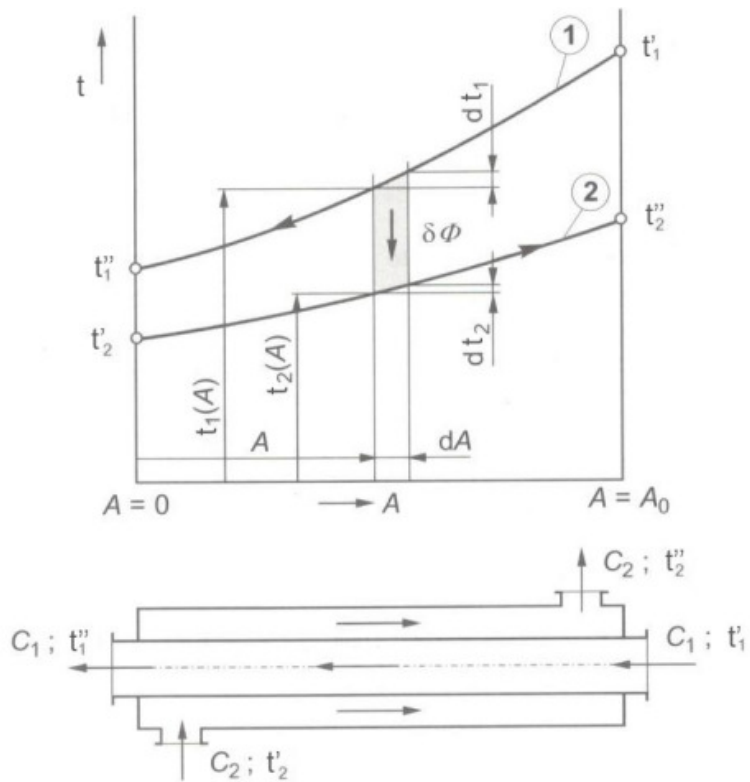
$$\delta\phi = \delta Q = k \cdot (T_T - T_H) \cdot dA = \delta Q_T = \delta Q_H$$

$$\delta Q_T = -C_T \cdot dT_T$$

$$\delta Q_H = C_H \cdot dT_H$$

Prema tome za svaki fluid vrijede po dvije jednadžbe toplinskog toka.

Prikaz temperaturnog profila, za protustrujni izmjenjivač topline prikazan je na slici 10.



Slika 10. Temperaturni tok struja uzduž protustrujnog izmjenjivača topline

Srednja logaritamska razlika temperature, koja predstavlja pokretačku silu za izmjenu topline, definirana je izrazom:

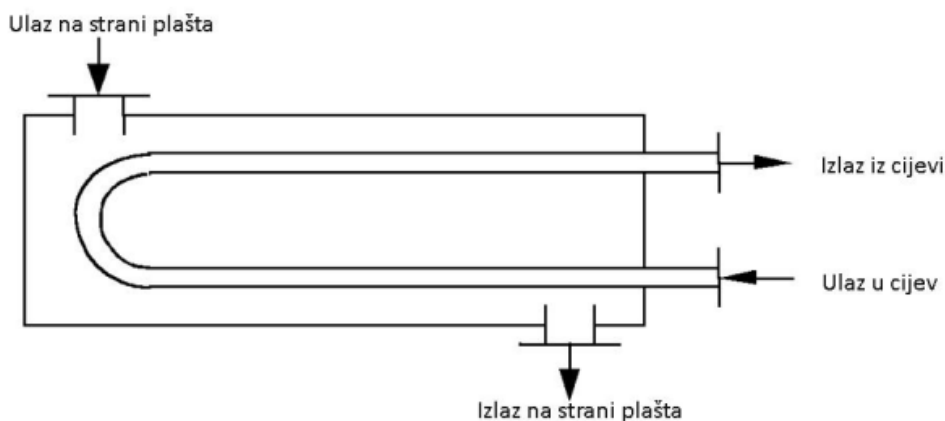
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

gdje je:

$\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  – razlika temperatura hladnog i toplog fluida na jednoj i na drugoj strani izmjenjivača

Indeks 1 se odnosi na veću razliku, a indeks 2 na manju razliku





Slika 11. Shematski prikaz protusmjernog izmjenjivača topline

Za protusmjerni tok fluida prikazan na slici 11, slijedi:

$$\Delta T_1 = T_{t1} - T_{h2} = t_1' - t_2''$$

$$\Delta T_2 = T_{t2} - T_{h1} = t_1'' - t_2'$$

Dakle izmjenjeni toplinski tok u izmjenjivačima protusmjernog i/ili istosmjernog toka može se prikazati konačnom toplinsko-kinetičkom jednadžbom:

$$\phi = k \cdot A \cdot \Delta T_m$$

gdje je:

$\Delta T_m$  – srednja logaritamska pokretačka sila procesa, odnosno srednja logaritamska razlika temperatura između “toplog” i “hladnog” fluida.

Izraz vrijedi za izmjenjivače topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i jednim prolazom fluida kroz cijevi. Kod izmjenjivača s više prolaza fluida kroz cijevi i/ili plašt, istovremeno su prisutni istosmjerni, protusmjerni i unakrsni tok. U takvim slučajevima dolazi do križanja temperatura, tj. u jednom dijelu cijevi i plašta “hladni” fluid ima višu temperaturu od “toplog” fluida. Tada je omjer  $\Phi/(k \cdot A)$  mnogo složenija funkcija o ulaznim i izlaznim temperaturama fluida. Pokretačka sila procesa će biti manja  $\Delta T_m$  za iste razlike temperature na ulazu i izlazu iz izmjenjivača ( $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$ ) za faktor korekcije  $F$ .

$$\Delta T_{m,kor} = \Delta T_m \cdot F$$

Osnovna jednačba za proračun izmjenjivača topline tada glasi:

$$\phi = k \cdot A \cdot \Delta T_{m, kor}$$

gdje je:

$\phi$  – toplinski tok (toplina prenesena u izmjenjivaču), kJ/h

$k$  – ukupni koeficijent prijenosa topline, kJ/(m<sup>2</sup> h K)

$\Delta T_{m, kor}$  – korigirana srednja logaritamska razlika temperatura između “toplog” i “hladnog” fluida, K.

Faktor korekcije, F, je funkcija dva bezdimenzijska omjera, R i P, tj.  $F = f(P, R)$ .

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}}$$

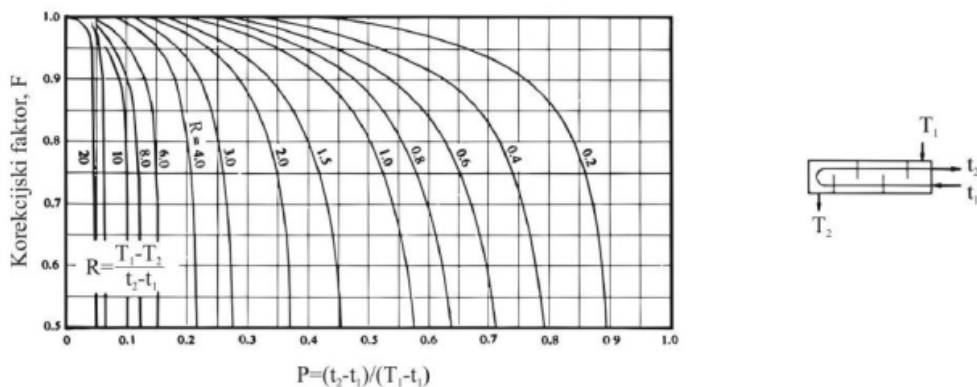
Parametar R je jednak omjeru kapacitivnih brzina  $\frac{c_H}{c_T} = \frac{(T_{T,1} - T_{T,2})}{(T_{H,2} - T_{H,1})}$ .

Parametar P je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$P = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}}$$

Vrijednosti faktora F za izmjenjivače s cijevnim snopom i plaštem mogu se naći u TEMA standardima.

Korekcijski faktor F za izmjenjivač topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i dva prolaza fluida kroz cijevi prikazan je na slici 12.



Slika 12. Dijagram ovisnosti  $F = f(P, R)$  za protusmjerni izmjenjivač topline

Očitavanje  $F$  s ravnog dijela krivulje može dovesti do velike pogreške. Stoga se ne preporučuje računanje s  $F$  manjim od 0,75. Ukoliko se dobije faktor manji od 0,75 treba pokušati s izmjenjivačem s više prolaza kroz plašt dok se ne dobije zadovoljavajuća vrijednost korekcijskog faktora.

### 3.2. Koeficijent prolaza topline

Koeficijent prolaza topline (ili ukupni koeficijent prijenosa topline) bitna je veličina pri proračunu izmjenjivača topline. Koeficijent prolaza topline ovisi o koeficijentima prijelaza topline s jedne i druge strane razdjelne stijenke, njenoj geometriji i njenoj toplinskoj provodnosti.

Ukupni koeficijent prijenosa topline, u praksi se računa prema izrazu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + r_0 + r_c + r_i \cdot \frac{A_0}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_0}{A_i}}$$

gdje je:

$k$  – ukupni koeficijent prolaza topline,  $W/(m^2 K)$

$\alpha_0$  – koeficijent prijenosa topline na vanjskoj stijenci cijevi,  $W/(m^2 K)$

$\alpha_i$  – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj stijenci cijevi,  $W/(m^2 K)$

$r_i, r_0$  – otpori prijenosu topline zbog onečišćenja unutarnje i vanjske stijenske cijevi,  $(m^2 K)/W$

Da bi se koeficijenti prijenosa topline i otpori sveli na istu površinu prijenosa topline,  $\alpha_i$  i  $r_i$  množe se omjerom vanjske i unutarnje površine cijevi  $\frac{A_0}{A_i}$ .

U izrazu za koeficijent prolaza topline, kao i u izrazima za toplinske kapacitete pojedinih strujaa javljaju se i fizikalna svojstva struja (fluida).

Fizikalna svojstva fluida ovise o temperaturi. Kako bi se navedena temperaturna ovisnost uzela u obzir, fizikalna svojstva fluida uzimaju se iz toplinskih tablica pri temperaturi  $t_m$  koja odgovara aritmetičkoj sredini ulazne i izlazne temperature promatrane struje, tj.

$$t_m = \frac{t' + t''}{2}$$

gdje je:

$t_m$  – aritmetička sredina temperature promatrane struje, K

$t'$  - ulazna temperatura struje fluida, K

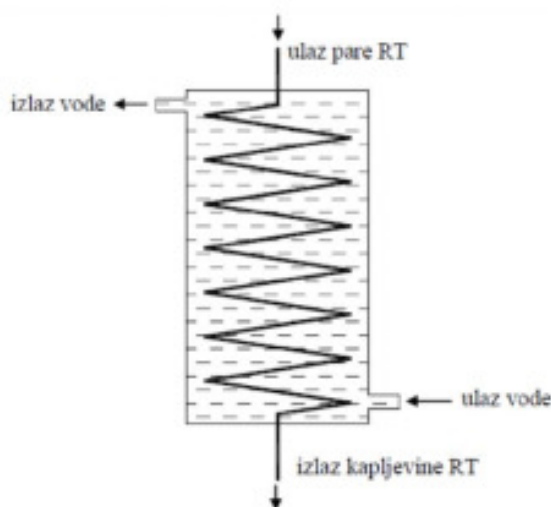
$t''$  - izlazna temperatura struje fluida, K

## 4. KONDEZATORI

### 4.1. Kondezatori s cijevnom zavojnicom u bubnju

Primjenjuju se za male toplinske učinke ( od 1 do 5vkW) i najjednostavnije rashladne uređaje. Nedostatak ovakvih vrsta kondezatora je relativno velik pad tlaka radne tvari koja struji kroz cijevnu zavojnicu i mali koeficijent prijelaza topline sa strane vode. Ovaj nedostatak se može umanjiti postavljanjem miješalice na strani vode, pri čemu će se povećati koeficijent prijelaza topline sa stjenke cijevne zavojnice na vodu. Ovakva izvedba izmjenjivača topline pogodna je za pripremu potrošne tople vode čime se stupanj djelovanja sustava povećava.

Na slici 10. prikazana je jedna izvedba kondezatora sa cijevnom zavojnicom u bubnju.



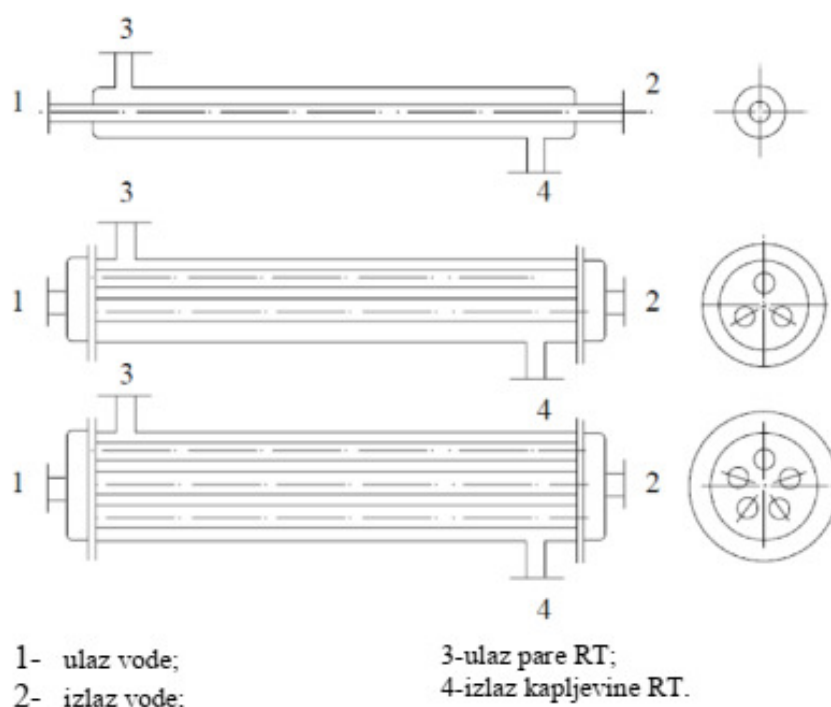
Slika 13. Kondezator sa cijevnom zavojnicom u bubnju

### 4.2. Protustrujni kondezatori

Kod ove vrste kondenzatora jedna ili više cijevi manjeg promjera nalaze se unutar vanjske cijevi većeg promjera. Kroz unutrašnju cijev, ili cijevi, struji voda, a oko njih, u

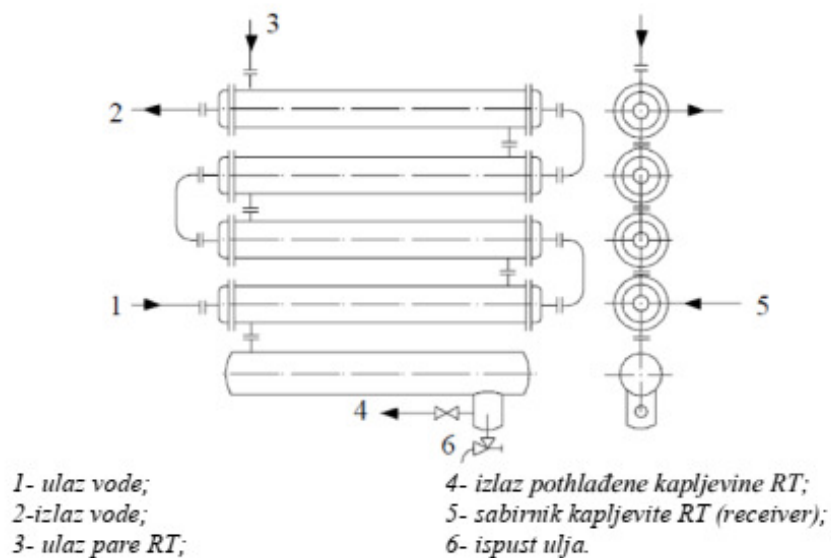
unutrašnjosti vanjske cijevi, kondenzira radna tvar. Kod višecijevnih kondenzatora poklopci na strani vode trebaju biti rastavljivi radi omogućavanja čišćenja kamenca. Ako se vanjska cijev savije u zavojnicu dobiva se koaksijalni kondenzator sa spiralno svijenom cijevi u cijevi. U unutrašnjoj cijevi protječe voda, a oko nje se, u plaštu vanjske cijevi, kondenzira radna tvar. Oko unutrašnje cijevi obično je u obliku zavojnice namotana i spiralna traka radi poboljšanja prijelaza topline. Kod ovakve izvedbe nije moguće mehaničko čišćenje cijevi od kamenca.

Na slici 14. prikazana je jedna od izvedbi protustrujnog kondenzatora.



Slika 14. Protustrujni kondenzator

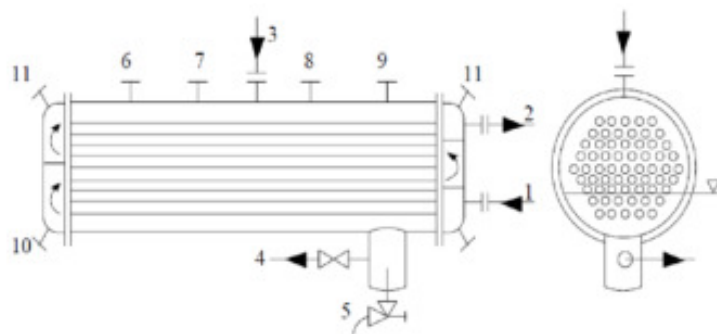
Na slici 15. prikazana je izvedba protustrujnih međusobno povezanih kondenzatora.



Slika 15. Protustrujni kondezatori koji su međusobno povezani

#### 4.3. Shell and Tube kondezator (Kondezator sa snopom cijevi u plaštu)

Ovakvi kondenzatori izvide se u svim veličinama. Radna tvar kondenzira se na snopu cijevi, a voda protječe kroz cijevi u jednom ili više prolaza. Uobičajene su izvedbe s ravnim, uglavnom horizontalno postavljenim cijevima. Tamo gdje je na raspolaganju mali tlocrtni prostor za smještaj cijevi mogu biti vertikalne, ali to smanjuje koeficijent prijelaza topline sa strane radne tvari. Cijevi, promjera 19 do 25 mm, mogu biti glatke, ali su češće orebrene rebrima niskog profila (0,9–1,5 mm visine i 0,64–1,3 mm razmaka). Na slici 16. prikazana je jedna od izvedbi kondenzatora sa cijevima u plaštu. [3]



1- ulaz vode;  
 2- izlaz vode;  
 3- ulaz pare RT;  
 4- izlaz kapljevite RT;  
 5- ispust ulja;

6- priključak za sigurnosne ventile;  
 7- priključak za izjednačenje tlaka;  
 8- priključak za manometar  
 9- odvod nekondenzirajućih plinova;  
 10- ispust vode;  
 11- odzračivanje.

Slika 16. Shell and tube kondezator

#### 4.4. Kondezatori hlađeni zrakom ili vodom koja ishlapljuje

Ovaj se način hlađenja koristi u slučaju smanjenog resursa rashladne vode. Toplina prelazi sa rashladne tvari koja kondenzira u cijevima kondezatora na vodu za hlađenje koja se raspršuje po cijevima ili se slijeva preko njih. Voda predaje toplinu zraku tako da dio vode ishlapljuje oduzimajući toplinu ostaloj vodi. Voda koja se slijeva niz cijevi skuplja se u okapnici odakle se crpkom vraća natrag do sapnica za raspršivanje. Cirkulacija zraka može biti:

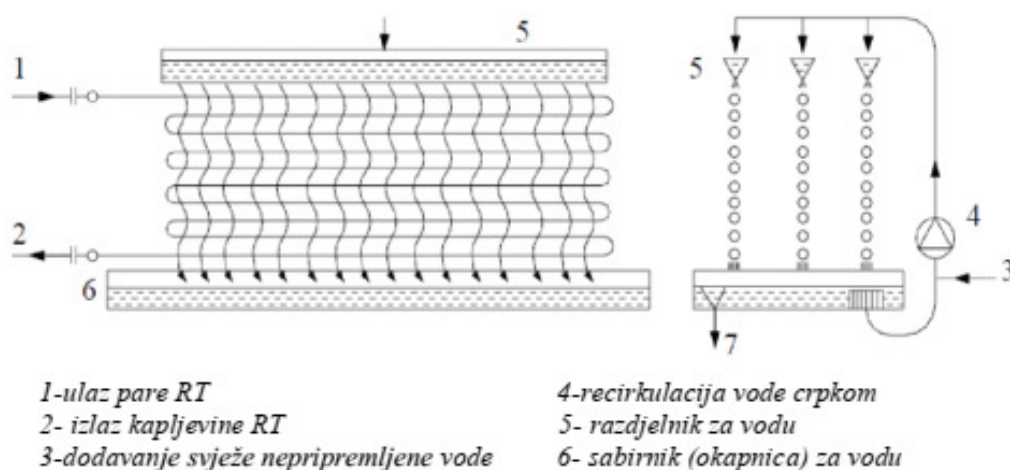
- prirodna (atmosfera kondezatori)
- prisilna (evaporativni kondezatori)

##### 4.4.1. Prirodni kondezator (atmosfera kondezator)

Zbog bolje izmjene topline ovakvi se kondenzatori postavljaju na nezaštićenim mjestima kako bi se osiguralo dobro strujanje zraka. Postavljaju se uglavnom na krovovima objekata. Izrađuju se od glatkih cijevi, glomazni su i teški. Danas se rjeđe koriste, uglavnom u industrijskim postrojenjima koja koriste nepripremljenu optočnu vodu. Nedostatak ovakvih



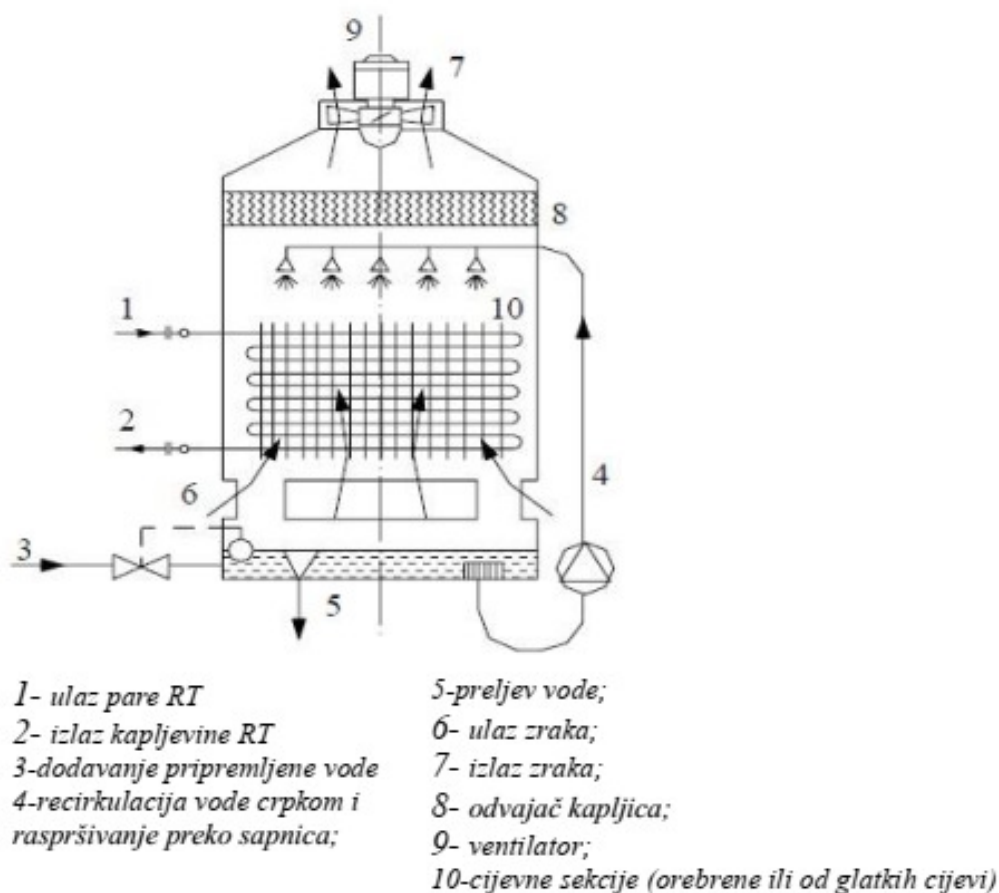
kondenzatora je ta što je potrebno često čišćenje cijevi radi rasta algi i taloženja mulja. U svrhu pristupa zbog čišćenja potrebno je osigurati dovoljan razmak između cijevnih sekcija. Postoje izvedbe s istosmjernim i protusmjernim tokom radne tvari i rashladne vode. Na slici 17. prikazana je jedna izvedba atmosferskog kondenzatora. [3]



Slika 17. Atmosferski kondenzator

#### 4.4.2. Evaporativni kondenzator

U sabirnik vode (okapnicu) dodaje se demineralizirana voda, kako bi nadoknadila ishlapjelu vodu. Protok zraka preko kondenzatora kreće se od 100 do 200 m<sup>3</sup>/h za 1 kW odvedene topline. Zbog relativno velikih brzina strujanja zraka (3 - 5 m/s) na izlazu se ugrađuje eliminator kapljica. Protok zraka može se ostvariti aksijalnim ventilatorima, koji usisavaju zrak, ili radijalnim koji tlače zrak u evaporativni kondenzator. Ovi se kondenzatori koriste uglavnom u industrijskim postrojenjima s amonijakom (R 717). Voda se koristi u svrhu povećanja prijelaza topline sa strane zraka, pa površine ovakvih kondenzatora mogu biti manje nego kod kondenzatora hlađenih samo zrakom. Na slici 18. prikazana je izvedba evaporativnog kondenzatora s prisilnom cirkulacijom zraka. [3]



Slika 18. Evaporativni kondezator

#### 4.5. Čišćenje kondezatora

Postupak čišćenja kondenzatora treba provesti kada njegov toplinski učinak padne ispod propisane vrijednosti. Samo čišćenje može se izvršiti mehaničkim i kemijskim putem. Unutrašnjost cijevi mogu se čistiti mehaničkim sredstvima, dok se vanjski dijelovi cijevi mogu čistiti raznim tekućim otopinama tj. kemijskim sredstvima. Prilikom upotrebe kemijskih sredstava potrebno je imati podatke o njihovom djelovanju na materijal od kojeg su izrađene cijevi, kućište i drugi dijelovi kondenzatora kako bi se izbjegli neželjeni učinci kemijskih sredstava na materijal kondenzatora. Prije nego li se pristupi samom čišćenju savjetuje se čišćenje unutrašnjosti cijevi s posebnim četkama zbog toga što se na takav način odstranjuju tvari koji su manje tvrdoće i samim time ostvaruje prolaz kemikalija do tvrdih naslaga. Najintenzivnije oštećenje nastaje kada se kao rashladni medij koristi morska voda, zbog

sadržaja raznih tvari organskog i mineralnog porijekla, raznih morskih algi itd. Na cijevima izloženim nečistom vodom često se nakupe naslage soli i alga te su u tom slučaju najefikasnije mehaničke metode čišćenja. Kada tvrda voda cirkulira cijevima, formiraju se tvrdi ostatci kalcijevog karbonata, kalcijevog sulfata ili silikata. Kod čišćenja kalcijevog karbonata, najbolje je upotrebljavati kemijske rastvore, dok se ostale naslage odstranjuju mehaničkim čišćenjem. Mekane naslage odstranjuju se četkama, dok se tvrde naslage odstranjuju pažljivim brušenjem.

## 5. ISPARIVAČI

Ovisno o konstrukciji isparivača, isparivanje se može vršiti na ogrjevnoj površini u velikom volumenu (isparivanje u posudi) ili cijevima. U oba slučaja isparavanje se može odvijati u uvjetima slobodnog prirodnog ili prisilnog kretanja radne tvari. Mehanizam izmjene topline pri isparavanju je složen. Kod isparavanja u posudi velikog volumena iznad grijane površine, koeficijent prijelaza topline s unutrašnje stjenke isparivača na radnu tvar ovisi o toplinskim svojstvima radne tvari (gustoći, specifičnom toplinskom kapacitetu, viskoznosti, koeficijentu provođenja topline i dr.), o hrapavosti površine isparivača koja je u dodiru s radnom tvari, o tlaku odnosno temperaturi zasićenja, razlici temperatura stjenki i radnih tvari, o geometrijskom obliku površine isparivača te o nizu drugih faktora (čiji utjecaji imaju manje utjecaje).

Prema namjeni isparivači se mogu podijeliti na:

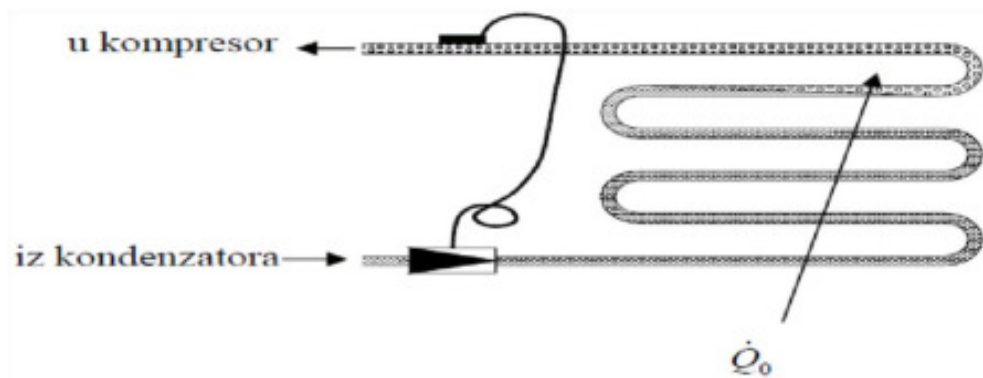
- isparivači za hlađenje kapljevina
- isparivači za hlađenje zraka (plinova)
- isparivači za hlađenje i smrzavanje proizvoda
- specijalni isparivači (npr. isparivači – kondezatori u kaskadnim rashladnim uređajima)

Prema načinu isparivanja i regulacijom napajanja radne tvari razlikuju se:

- suhi isparivači
- potopljeni isparivači

### 5.1. Suhi isparivači

Suhi isparivači koriste se za hlađenje zraka, kao i za hlađenje kapljevina. U njima radna tvar potpuno isparuje, a para se pregrijava u izlaznoj zoni isparivača. Odgovarajućim načinom regulacije osigurava se da na izlazu iz isparivača para bude pregrijana. Prave se od glatkih ili orebrenih cijevi, kao isparivači s cijevima u plaštu, kao pločasti ili kao koaksijalni isparivači. Na slici 19. prikazana je jedna izvedba suhog isparivača.

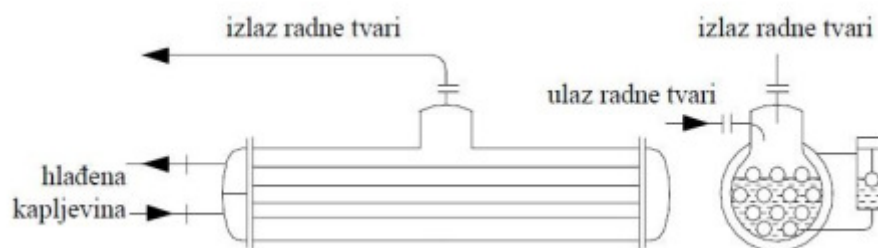


Slika 19. Suhi isparivač

## 5.2. Potopljeni isparivač

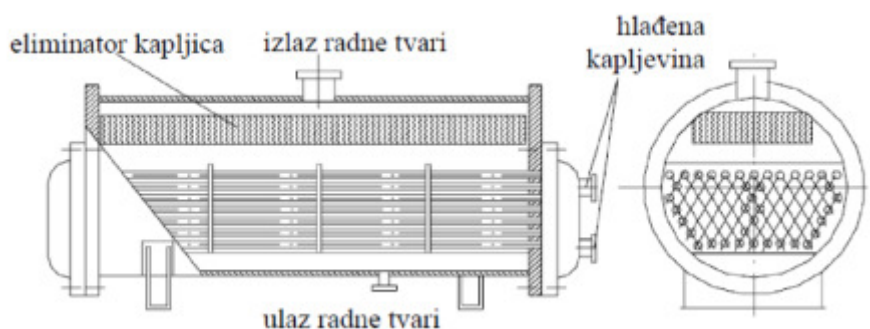
Potopljeni isparivači su skoro potpuno ispunjeni kapljevnom radne tvari. Izrađuju se u obliku cijevnih snopova od glatkih ili orebrenih cijevi, ili kao isparivači s cijevnim snopom u plaštu. Prijelaz topline na strani radne tvari je intenzivniji nego kod suhih isparivača, jer je cijela površina unutrašnjih stijenki u dodiru s kapljevnom. Cirkulacija radne tvari u potopljenim isparivačima može biti prirodna ili prisilna, kada kroz njih cirkulira nekoliko puta više kapljevne nego što ispari. Koriste se uglavnom u većim rashladnim instalacijama.

Na slici 20. prikazana je jedna od izvedbi potopljenog isparivača s cijevima u plaštu.



Slika 20. Potopljeni isparivač s cijevima u plaštu

Na slici 21. prikazan je potopljeni isparivač s cijevima u plaštu s eliminatorom kapljica radne tvari.

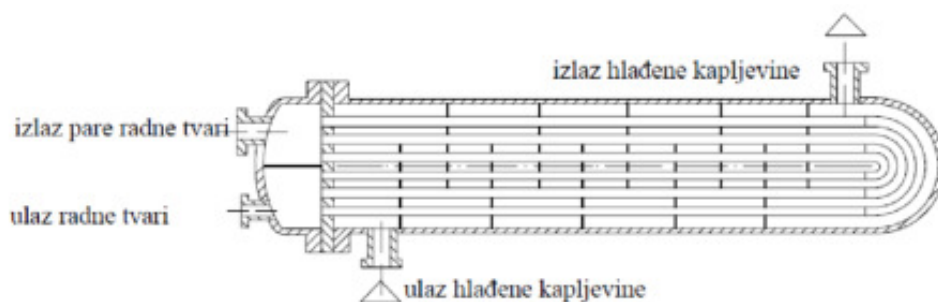


Slika 21. Potopljeni isparivač s eliminatorom kapljica radne tvari

### 5.3. Suhi isparivač s cijevima u plaštu

Radna tvar isparuje u cijevima, hladena kapljevina protječe oko snopa cijevi u plaštu. Koeficijent prijenosa topline je u granicama od 800 do 1500 W/(m<sup>2</sup> K), brzina gibanja tekućine kroz cijevi su od 0,15 do 0,3 m/s, dok je razlika primarne temperatura primarne tekućine od 5 do 15 K. Prigušivanje radne tvari je u termoekspanzijskom ventilu. Potrebno je osigurati pravilnu distribuciju radne tvari u cijevima. [3]

Na slici 22. prikazana je jedna izvedba isparivača za hlađenje kapljevine sa suhim isparivanjem i cijevnim snopom u plaštu s dva prolaza radne tvari. [3]

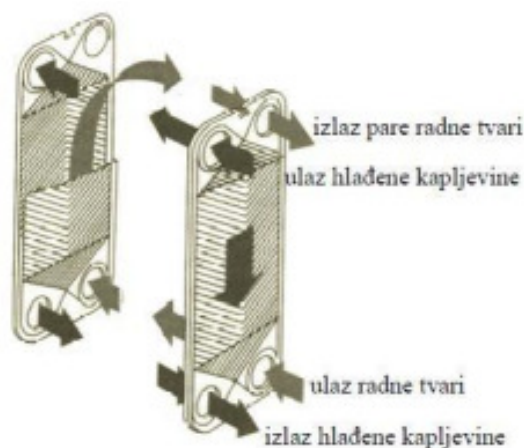


Slika 22. Isparivač za hlađenje kapljevine sa suhim isparivanjem i cijevnim snopom

## 5.4. Pločasti isparivači za hlađenje kapljevina

Najviše se primjenjuju na brodovima zbog svog jednostavnog, kompaktnog i prilagodljivog dizajna. Isparivanje radne tvari se odvija u kanalima koje čine profilirane ploče. S jedne strane ploče protječe radna tvar koja isparuje, a s druge strane hlađena radna tvar. Krajnje ploče zatvaraju izmjenjivač. Ploče su obično izrađene iz nehrđajućeg čelika i zalemljene bakrom ili niklom (nema brtvi).

Slika 23. prikazuje izvedbu pločastog isparivača.



Slika 23. Pločasti isparivač

## 5.5. Pločasti isparivač za tekućine

Oplata i okvir pločastog isparivača se sastoji od skupa modularnih ploča između kojih prolaze dvije vrste tekućina od kojih jedna predaje toplinu drugoj. Hladna i topla tekućina prolaze različitim smjerom i kanalom unutar izmjenjivača. Oplate služe kako bi odvojile hladnu i toplu tekućinu i time spriječili njihovo miješanje, ali i omogućile prijenos topline između te dvije tekućine. Oplate su valovitog oblika što uzrokuje stvaranje turbulentnog protoka što povećava prijenos topline i efikasnost izmjenjivača. Prednost pločastog izmjenjivača je ta što se rashladna površina može relativno jednostavno mijenjati ovisno o

zahtjevima. Za povećavanje površine dodaje se veći broj ploča odnosno oduzima za smanjenje površine.

## **5.6. Problemi kod pločastog izmjenjivača**

Kod korištenja pločastog izmjenjivača topline postoje tri problema koji se odnose na stvaranje taloga unutar izmjenjivača koji smanjuje protok i efikasnost izmjenjivača, a to su:

1. Biološki talog koji se pojavljuje kada se koristi prirodna voda (npr. voda iz rijeke). Takav talog može uzrokovati značajnu štetu, ako se ne čisti redovito.
2. Kemijski talog, odnosno kalcijev karbonat ili magnezijev karbonat setalože pri procesu hlađenja te se ta sol kristalizira na površini rashladnih ploča stvarajući talog
3. Korozija je najčešći problem kod izmjenjivača topline. Korozija se rješava korištenjem materijala koji su otporniji na koroziju, kao npr. nehrđajući čelik ili titan. Naravno cijena ovakvih materijala je skuplja.

Kako se talog unutar izmjenjivača nakuplja, efikasnost će opadati. Kako bi se to spriječilo izmjenjivači se moraju redovito tretirati s deterdžentima odnosno rastaviti i očistiti. Izmjenjivači su dizajnirani kako bi se proces čišćenja olakšao i bio što brži.



## **6. ZAHTJEVI KLASIFIKACIJSKOG ZAVODA ZA IZMJENJIVAČE TOPLINE**

Opći zahtjevi za nadzor, tehničku dokumentaciju, izradbu i materijale za izmjenjivače topline i posude pod tlakom, kao i način proračuna čvrstoće, navedeni su u tekstukoji slijedi. Dijelovi izmjenjivača topline i posuda pod tlakom koji dolaze u dodir s morskom vodom ili nekim drugim agresivnim sredstvima, moraju se izrađivati od materijala otpornih na ta sredstva. Ako se za izradbu koriste drugi materijali, o njihovoj zaštiti od korozije u svakom pojedinom slučaju posebno razmatra i odlučuje Registar.

### **6.1. Konstrukcijski zahtjevi**

Ako je potrebno, konstrukcijski se mora omogućiti toplinski istezanje plašta i pojedinih dijelova izmjenjivača topline i posuda pod tlakom. Plaštevi izmjenjivača topline i posuda pod tlakom moraju imati odgovarajuće oslonce za pričvršćenje na temelj. Ako je potrebno, treba predvidjeti pričvršćenje s gornje strane. Svaka posuda pod tlakom i svaki izmjenjivač topline mora imati natpisnu pločicu koja sadrži osnovne podatke o opremi.

### **6.2. Armatura**

Svaki izmjenjivač topline i svaka posuda pod tlakom, kao i odijeljene skupine posuda, moraju imati sigurnosni ventil neposredno spojen na posudu ili na priključak bez zaporne armature. Ako postoji više nepovezanih prostora, za svaki prostor mora se predvidjeti sigurnosni ventil. Hidrofori moraju imati sigurnosni ventil koji se nalazi u vodnom prostoru. U posebnim slučajevima, dogovorno s Registrom, može se odstupiti od navedenih zahtjeva. Po pravilu, sigurnosni ventili moraju biti s oprugom. Kod predgrijača goriva i ulja mogu se ugraditi sigurnosne membrane, koje se postavljaju na strani ulja i goriva. Izvedbu mora odobriti Registar.

### **6.3. Mjerni instrumenti**

Sigurnosni ventili moraju imati toliku propusnu moć da radni tlak ne može porasti za više od 10%. Sigurnosni ventili se reguliraju na tlak 3-5% iznad radnog tlaka. Sigurnosni ventili moraju biti izvedeni tako da se mogu plombirati, ili na drugi način zaštititi od mogućnosti regulacije ventila bez znanja odgovornog osoblja. Materijal opruga i brtvenih dijelova ventila mora biti otporan na djelovanje korozije. Okrugla stakla za promatranje na izmjenjivačima topline i posudama pod tlakom smiju se ugrađivati samo ako je to neophodno. Pokazivači razine moraju se postaviti na posude pod tlakom i izmjenjivače topline kod kojih pad razine tekućine koja se zagrijava može dovesti do nedopustivog porasta temperature. Pokazivači razine i stakla za promatranje moraju biti odgovarajuće izvedbe, i moraju biti na odgovarajući način zaštićeni. Pokazivači razine vode, goriva, ulja i rashladnog sredstva moraju imati ravna stakla. Za odzračivače se dopušta primjena okruglih stakala. Izmjenjivači topline i posude pod tlakom moraju imati zaporne uređaje za iskopčavanje cjevovoda koji su na njih priključeni, koji u pravilu trebaju biti postavljeni neposredno na plašt, na zavarene podloge, ili na ukružene cijevi s prirubnicom. Na hidroforima se dopušta pričvršćenje s narezom. Izmjenjivači topline i posude pod tlakom moraju imati odgovarajuće uređaje za propuhivanje i drenažu. Na izlaznoj strani iz sigurnosnog ventila mora se predvidjeti na najnižoj točki drenaža bez zapornih uređaja. Svaki izmjenjivač topline i svaka posuda pod tlakom, kao i međusobno odijeljene skupine posuda, moraju imati manometre ili vakuumetre. Ako su izmjenjivači topline pregrađeni na više međusobno neovisnih prostora, za svaki prostor treba predvidjeti posebni manometar. Grijači goriva u kojima temperatura goriva može prijeći 220 °C moraju, osim regulatora temperature, imati signalizaciju koja upozorava na previsoku temperaturu, ili prekid protoka goriva.

### **6.4. Kondenzatori**

Izvedba kondenzatora i njihov smještaj na brodu moraju omogućavati zamjenu cijevi. Plašt glavnog kondenzatora, po pravilu, mora biti čelične zavarene izvedbe. Unutar kondenzatora, na mjestima dovoda pare povišenog tlaka moraju se predvidjeti ploče za usmjeravanje, radi zaštite cijevi od neposrednog udara pare. Cijevi moraju biti tako

pričvršćene da je isključena mogućnost njihova izvijanja i opasnih vibracija. Poklopci vodenih komora kondenzatora moraju imati otvore, a njihov broj i smještaj mora omogućiti pristup do svake cijevi cijevnog snopa, radi uvaljavanja i brtvljenja, te isključivanja cijevi začepljenjem. Za zaštitu vodenih komora, cijevnih stjenki i cijevi od djelovanja elektrokemijske korozije, mora se predvidjeti zaštita s protektorima. Glavni kondenzator mora omogućiti rad i u slučaju nužnosti s isključenim bilo kojim stupnjem turboagregata. Kondenzator mora biti tako izveden da se na njega mogu priključiti instrumenti za kontrolu i mjerenje.

## 7. ZAKLJUČAK

Izmjenjivači topline su uređaji koji omogućuju izmjenu topline između dvije tekućine koje imaju različitu temperaturu dok ih u isto vrijeme sprječavaju da se miješaju (rekuperativni izmjenjivači topline). Izmjenjivači topline u praksi obično imaju široku primjenu, od grijanja i klimatizacijskih uređaja u kućanstvu, do kemijske obrade i proizvodnje električne energije u velikim postrojenjima. Prijenos topline u izmjenjivaču topline obično uključuje konvekciju s tekućine na stijenku i kondukciju (provođenje) kroz stijenku koja odvaja dva fluida.

U analizi izmjenjivača topline, obično je prikladno raditi s srednjom logaritamskom temperaturnom razlikom, koja je ekvivalentna srednjoj razlici temperatura između dviju tekućina kroz cijeli izmjenjivač topline. Efektivnost je najvažniji čimbenik kod odabira izmjenjivača topline. Izmjenjivač topline treba biti sposoban za prijenos topline kako bi se postigla željena promjena temperature tekućine na određenom protoku.

Troškovi održavanja izmjenjivača topline također su važan čimbenik tijekom procjene ukupnog troška. Naravno i čimbenik veličine je vrlo bitan. Što je manji i lakši izmjenjivač topline, to je povoljnije s obzirom na troškove njegovog održavanja i smanjivanjem njihove veličine povećava se iskoristivost korisnog (nosivog) prostora na brodovima. Vrsta izmjenjivača topline koja će biti odabrana ovisi prvenstveno o vrsti fluida koji se koriste, zahtjevima veličina i težine i prisutnost bilo kojeg procesa promjene agregatnog stanja. Na primjer, izmjenjivač topline je pogodan da ohladi tekućinu sa plinom, ako je površina na plinskoj strani puno veća od strane tekućine. S druge strane, pločasti ili cijev u plaštu izmjenjivač topline je vrlo prikladan za hlađenje tekućina sa drugom tekućinom. Materijali koji se koristi u izgradnji izmjenjivača topline mogu biti važan čimbenik u odabiru. Na primjer, u slučaju upotrebe korozivnih tekućina, biti će potrebno za izgradnju odabrati skupe nehrđajuće materijala poput nehrđajućeg čelika ili titana.

Koeficijent prijelaza topline moguće je dodatno povećati promjenom geometrije izmjenjivača topline, npr. valovitim lamelama ili orebrenjem iza cijevi gdje se uglavnom javljaju vrtloženja i slabije je zagrijavanje zraka. Mogućnosti je mnogo i da bi se postigli što kvalitetniji rezultati, potrebno je izvršiti detaljnije usporedbe između pojedinih izvedbi izmjenjivača topline.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Načelna podjela izmjenjivača topline .....	4
Slika 2. Kombinirani rekuperativni toplinski aparat .....	6
Slika 3. Shematski prikaz regenerativnog toplinskog aparata.....	7
Slika 4. Direktni izmjenjivač topline.....	8
Slika 5. Cijevni izmjenjivač topline Shell and Tube .....	9
Slika 6. Spiralni pločasti izmjenjivač topline.....	10
Slika 7. Istosmjerni izmjenjivač topline .....	11
Slika 8. Protusmjerni izmjenjivač topline .....	11
Slika 9. Križni (unakrsni) izmjenjivač topline .....	12
Slika 13. Kondezator sa cijevnom zavojnicom u bubnju .....	22
Slika 14. Protustrujni kondezator .....	23
Slika 15. Protustrujni kondezatori koji su međusobno povezani .....	24
Slika 16. Shell and tube kondezator .....	25
Slika 17. Atmosferski kondezator .....	26
Slika 18. Evaporativni kondezator .....	27
Slika 19. Suhi isparivač .....	30
Slika 20. Potopljeni isparivač s cijevima u plaštu .....	30
Slika 21. Potopljeni isparivač s eliminatorom kapljica radne tvari.....	31
Slika 22. Isparivač za hlađenje kapljevine sa suhim isparivanjem i cijevnim snopom.....	31
Slika 23. Pločasti isparivač.....	32

## LITERATURA

- [1] Orest Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet u Dubrovniku, 1994.
- [2] Antun Galović, Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2010.
- [3] Branimir Pavković, "Tehnika hlađenja," Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka,  
[http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/nas/tehnika\\_hladjenja\\_07](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/tehnika_hladjenja_07)  
2019
- [4] Hrvatski registar brodova, "Pravila za klasifikaciju brodova: Kotlovi, izmjenjivači topline i posude pod tlakom," Hrvatski registar brodova, Split, 2015.
- [5] Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design; Sadik Kakaç, Hongtan Liu; CRC Pres LLC; Florida, 2002
- [6] Fran Bošnjaković, Nauka o Toplini, Svezak I., II. i III., V. Izdanje, Graphis d.o.o, Zagreb, 2012.
- [7] <http://www.thermopedia.com/content/832/> , 2019.